

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ПІЛОВОАНОЇ ТА БЕЗПІЛОТНОЇ АВІАЦІЇ

[DOI 10.33099/2786-7714-2024-1-6-87-92](https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-87-92)

[УДК 519.2 – 623.7](#)

**Яблонський Петро Михайлович** (кандидат технічних наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0003-2651-4299>

**Майстров Олексій Олексійович** (кандидат технічних наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0002-9054-8293>

**Косков Юрій Максимович**

<https://orcid.org/0000-0003-4707-9898>

**Сарапін Юрій Олександрович**

<https://orcid.org/0000-0003-2893-4975>

*Національний університет оборони України, Київ, Україна*

### ВИЗНАЧЕННЯ ЙМОВІРНОСТІ СТАНІВ ДОПЛЕРІВСЬКОГО ВИМІРЮВАЧА ШЛЯХОВОЇ ШВИДКОСТІ ТА КУТА ЗНЕСЕННЯ ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ З ВИКОРИСТАННЯМ МАРКОВСЬКОГО ВИПАДКОВОГО ПРОЦЕСУ

*В роботі досліджено актуальне питання точності навігації літальних апаратів. Здійснено розрахунок ймовірностей станів доплерівського вимірювача з використанням марковського випадкового процесу, який передбачає побудову математичної моделі досліджуваного об'єкту з застосуванням дискретних станів та безперервного часу. Запропонований метод математичного моделювання передбачає застосування експоненціального закону розподілу часу перебування у станах моделі. На основі отриманих аналітичних залежностей побудовані графіки перебування доплерівського вимірювача у станах моделі. Отримані в роботі результати математичного моделювання можуть бути використані для оцінки ефективності бомбометання з літального апарату під час його горизонтального польоту.*

**Ключові слова:** математична модель, система, моделювання, розрахунок ймовірностей, ефективність, відмова, марковські процеси.

#### Вступ

Точна навігація є критично важливою для безпечного й ефективного виконання польотів. Доплерівський метод вимірювання швидкості руху та зносу можна характеризувати як один із найпоширеніших та найточніших.

Для визначення шляхової швидкості літаків бомбардувальної та військово-транспортної авіації, а також гелікоптерів, застосовуються доплерівські вимірювачі шляхової швидкості та кута знесення (ДВ). Вимірювання координат здійснюються у літаковій зв'язаній системі координат. Антени таких вимірювачів жорстко прикріплені до літального апарату (ЛА). Під час польоту ЛА з креном, наприклад, більше  $10^\circ$  і тангажом, більшим  $28^\circ$ , діаграма спрямованості ДВ відривається від землі і такий вимірювач визначає шляхову швидкість з великою похибкою. Для усунення цього недоліку в алгоритмі роботи ДВ передбачено його перехід в так званий режим "Пам'ять". В такому режимі запам'ятовуються останні значення

шляхової швидкості, яка використовується для обчислення поточних координат ЛА. Політ ЛА в режимі "Пам'ять" може тривати протягом 20-30 хвилин.

Визначення шляхової швидкості може здійснюватися інерціальними системами навігації, які мають суттєві недоліки. Наприклад, на літаках бомбардувальної авіації для забезпечення роботи малогабаритної інерціальної системи необхідно перед польотом розкручувати ротор гіроскопа взимку протягом 39 – 45 хвилин у залежності від температури повітря, щоб платформа, на якій розташовані акселерометри, була паралельна до земної поверхні. Це суттєво впливає на боєготовність літака. При цьому точність визначення шляхової швидкості літака нижча, ніж у ДВ.

На літаках винищувальної авіації ДВ не встановлювалися через те, що літак часто змінює своє кутове положення у просторі, і робота ДВ втрачає сенс. Для визначення шляхової швидкості

на літаках винищувальної авіації застосовується інформаційний канал вертикалі і курсу, який має значно гіршу точність, ніж ДВ. Саме тому точність бомбометання з літаків винищувальної авіації значно відрізняється від точності бомбардувальної авіації.

В науково-технічній літературі цьому питанню приділяється мало уваги. Тому у статті зроблена спроба кількісної оцінки ймовірності перебування доплерівського вимірювача у справному стані під час горизонтального польоту і ймовірностей перебування у режимі “Пам’ять”, що є необхідною умовою оцінки ефективності, наприклад, бомбометання з горизонтального польоту.

Для побудови математичної моделі роботи ДВ використовується марковський випадковий процес, властивості якого описані багатьма науковцями, які досліджували особливості експлуатації озброєння та військової техніки [1-8]. При цьому враховано типові значення інтенсивності переходів у режим “Пам’ять” [9] та з режиму “Пам’ять” в режим нормальної роботи.

Метою статті є побудова математичної моделі ДВ та розрахунок ймовірностей станів ДВ з використанням марковського випадкового процесу для оцінки впливу роботи ДВ на ефективність виконання літаком бойових завдань.

### Матеріали та методи

У даному дослідженні для досягнення визначеної мети застосовуються наукові методи математичного моделювання, системного аналізу та синтезу, метод порівняння та аналогій, а також чисельний метод для проведення розрахунків ймовірностей станів ДВ від досліджуваних параметрів експлуатації.

### Результати

Радіотехнічний метод вимірювання шляхової швидкості ЛА заснований на ефекті доплерівського зсуву частоти, сутність якого полягає в зміні частоти прийнятих коливань при відносному русі приймача й передавача коливань [10-11].

Вектор шляхової швидкості  $W$  є сума векторів повітряної швидкості літака  $V$  і швидкості вітру  $U$  (рис. 1).

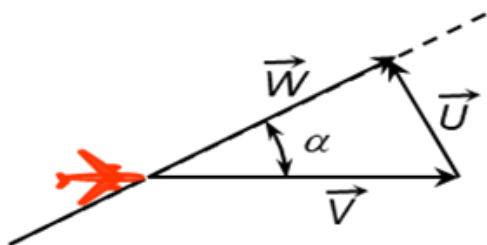


Рисунок 1. Вектори повітряної швидкості літака і швидкості вітру

В однопроменевому вимірювачі під час горизонтального польоту без крену і тангажу швидкість зближення з ділянкою підстилаючої поверхні в напрямку  $\beta_0$  і доплерівський зсув частоти відбитого сигналу пропорційні його шляховій швидкості.

Через боковий вітер виникають помилки не тільки в визначенні величини шляхової швидкості, але і в положенні її вектору.

При польоті з креном або тангажем внаслідок зміщення вбік відносно лінії шляху або впродовж лінії шляху ділянки поверхні, що опромінюється, виникають додаткові помилки вимірювання шляхової швидкості.

В реальних доплерівських вимірювачах шляхової швидкості  $W$  і кута зносу  $\alpha$  для усунення впливу бокового вітру, крену і тангажу літака застосовують трьохпроменеві або чотирипроменеві антенні системи (рис. 2).

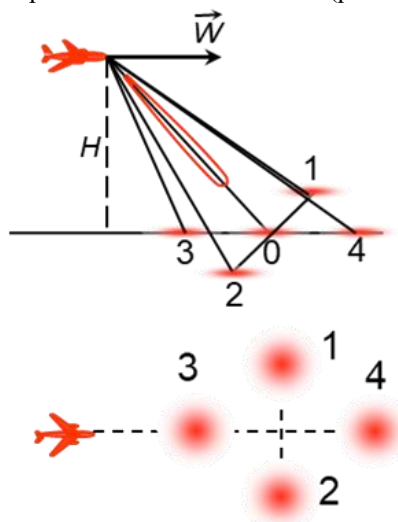


Рисунок 2. Приклад застосування трьохпроменевих або чотирипроменевих антенних систем

В чотирипроменевому вимірювачі швидкість зближення з ділянками підстилаючої поверхні 1...4 залежить від повітряної швидкості літака  $V$ , вектор якої співпадає з віссю літака, і вектору швидкості вітру  $U$ . Різниця доплерівських зсувів частоти сигналів, що надійшли від діагональних (непарних та парних) ділянок підстилаючої поверхні, становлять:

$$\Delta F_{1,3} = \frac{4W}{\lambda} \cos \beta_0 \cos(\gamma - \alpha) \quad (1)$$

$$\Delta F_{2,4} = \frac{4W}{\lambda} \cos \beta_0 \cos(\gamma + \alpha)$$

По виміряним  $\Delta F_{1,3}$  і  $\Delta F_{2,4}$  шляхом рішення системи рівнянь (1) знаходиться шляхова швидкість і кут зносу літака [12].

Аналіз багатопроменевих систем показує, що вони мало чутливі до зміни просторового положення літака і ступеня когерентності зондуючих сигналів.

Будемо вважати, що ДВ може знаходитись у трьох станах:  $X$  (працездатності),  $\bar{X}$  (стан тимчасового відновлення) та  $\bar{X}$  (відмова ДВ). Під тимчасовою відмовою ДВ розуміють його перехід до режиму “Пам’ять”. Послідовність можливих переходів ДВ до режиму “Пам’ять” за даними бортових систем об’єктивного контролю в першому наближенні можна описати стаціонарним

Пуассонівським потоком [13]. Вектор технічного стану ДВ можна представити так:

$$H = \begin{pmatrix} H_1 & X \\ H_2 & \sim X \\ H_3 & X \end{pmatrix}$$

На рисунку 3 зображений орієнтовний граф станів ДВ, на якому біля стрілок позначені відповідні перехідні ймовірності.

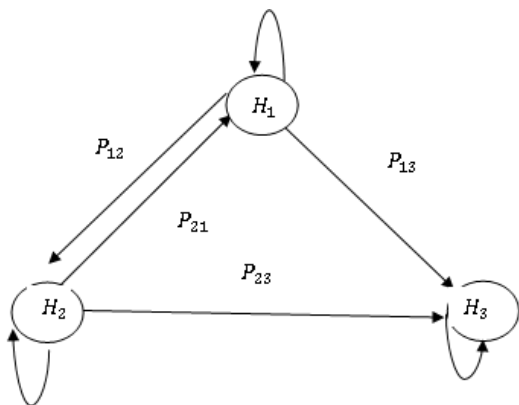


Рисунок 3. Граф станів ДВ

Процес переходів ДВ з стану в стан характеризується інтенсивністю переходів [14]:

$\mu$  – інтенсивність переходу ДВ до режиму “Пам’ять”;

$\lambda$  – інтенсивність переходів ДВ з режиму “Пам’ять” до стану повної відмови;

$\nu$  – інтенсивність переходів ДВ з режиму “Пам’ять” до працездатного стану.

Для малого інтервалу часу  $\Delta t$  перехідні ймовірності визначаються рівняннями:

$$P_{11}(t_1, t_1 + \Delta t) = 1 + a_{11}(t)\Delta t + o(\Delta t) = 1 + a_{11}(t)\Delta t \quad (2)$$

$$P_{12}(t_1, t_1 + \Delta t) = a_{12}(t)\Delta t + o(\Delta t) = \mu\Delta t; \quad a_{12}(t) = \mu \quad (3)$$

$$P_{13}(t_1, t_1 + \Delta t) = a_{13}(t)\Delta t + o(\Delta t) = \lambda\Delta t; \quad a_{13}(t) = \lambda \quad (4)$$

$$P_{22}(t_1, t_1 + \Delta t) = 1 + a_{22}(t)\Delta t + o(\Delta t) = 1 + a_{22}(t)\Delta t \quad (5)$$

$$P_{21}(t_1, t_1 + \Delta t) = a_{21}(t)\Delta t + o(\Delta t) = \nu\Delta t; \quad a_{21}(t) = \nu \quad (6)$$

$$P_{23}(t_1, t_1 + \Delta t) = a_{23}(t)\Delta t + o(\Delta t) = \lambda\Delta t; \quad a_{23}(t) = \lambda^* \quad (7)$$

$$P_{33}(t_1, t_1 + \Delta t) = 1 + a_{33}(t)\Delta t + o(\Delta t) = 1 + a_{33}\Delta t \quad (8)$$

$$P_{31}(t_1, t_1 + \Delta t) = 0; \quad a_{31}(t) = 0 \quad (9)$$

$$P_{32}(t_1, t_1 + \Delta t) = 0; \quad a_{32}(t) = 0 \quad (10)$$

Параметри  $\mu$  та  $\nu$  можна знайти на підставі аналізу експлуатації конкретного типу ДВ. На літаках бомбардувальної авіації переходи до режиму “Пам’ять” фіксуються в певних чарунках оперативного запам’ятовуючого пристрою. Після польоту за допомогою апаратури “Верба” дані чарунки, де зафіксовані переходи до режиму “Пам’ять”, можуть бути розшифровані і використані для подальшого застосування, у тому числі і для побудови математичної моделі. Можна вважати що з достатньою точністю  $\lambda = \lambda^*$ .

Інтенсивності переходів  $a_{ii}(t) = a_{ji}$ , що входять до рівнянь (2 – 10), можуть бути знайдені з умови нормування  $a_{ii}(t) = -\sum_{j=1}^M a_{ij}(t)$ ;  $i \neq j$ .

$$a_{11}(t) = -[a_{12}(t) + a_{13}(t)] = -(\mu + \lambda) \quad (11)$$

$$a_{22}(t) = -[a_{21}(t) + a_{23}(t)] = -(\nu + \lambda) \quad (12)$$

$$a_{33}(t) = -[a_{31}(t) + a_{32}(t)] = 0 \quad (13)$$

Перехідна матриця та матриця інтенсивностей переходів згідно з формулами (2 – 10) та (11 – 13) мають вигляд:

$$P(\Delta t) = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - (\mu + \lambda)\Delta t & \mu\Delta t & \lambda\Delta t \\ \nu & 1 - (\nu + \lambda)\Delta t & \lambda\Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -(\mu + \lambda) & \mu & \lambda \\ \nu & -(\nu + \lambda) & \lambda \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$A^T = \begin{pmatrix} -(\mu + \lambda) & \nu & 0 \\ \mu & -(\nu + \lambda) & 0 \\ \lambda & \lambda & 0 \end{pmatrix} \quad (16)$$

Запишемо систему диференціальних рівнянь для ймовірностей станів ДВ для довільного моменту часу при використанні дискретних станів і безперервного часу, що дає можливість використання марковського випадкового процесу [15, 16].

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} P_1(t) &= -(\mu + \lambda)P_1(t) + \nu P_2(t) \\ \frac{d}{dt} P_2(t) &= \mu P_1(t) - (\nu + \lambda)P_2(t) \\ \frac{d}{dt} P_3(t) &= \lambda P_1(t) + \lambda P_2(t) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Рішенням системи (17) диференціальних рівнянь є ймовірності станів ДВ.

$$P_1(t) = \frac{\nu}{\mu + \lambda} e^{-\lambda t} + \frac{\mu}{\mu + \nu} e^{-(\lambda + \mu + \nu)t} \quad (18)$$

$$P_2(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} e^{-\lambda t} + \frac{\mu}{\mu + \nu} e^{-(\lambda + \mu + \nu)t} \quad (19)$$

$$P_3(t) = 1 - P_1(t) - P_2(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} P_{12}(t) &= a_{12}(t)P_{11}(t) + a_{22}(t)P_{12}(t) + a_{32}P_{13}(t) = \\ &= \mu P_{11}(t) - (\nu + \lambda)P_{12}(t) = \mu[1 - P_{12}(t) - P_{13}(t)] = \\ &= (\nu + \lambda)P_{12}(t) = -(\mu + \nu + \lambda)P_{12}(t) - \mu P_{13}(t) + \mu \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} P_{13}(t) &= a_{13}(t)P_{11}(t) + a_{23}(t)P_{12}(t) + a_{33}P_{13}(t) = \\ &= \lambda P_{11}(t) + \lambda P_{12}(t) = \lambda[1 - P_{12}(t) - P_{13}(t)] + \lambda P_{12}(t) = \\ &= -\lambda P_{13}(t) + \lambda \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} P_{21}(t) &= a_{11}(t)P_{21}(t) + a_{21}(t)P_{22}(t) + a_{31}P_{23}(t) = \\ &= -(\mu + \lambda)P_{21}(t) + \nu P_{22}(t) = \\ &= -(\mu + \lambda)P_{21}(t) + \nu[1 - P_{21}(t) - P_{23}(t)] = \\ &= -(\mu + \lambda + \nu)P_{21}(t) - \mu P_{23}(t) + \nu \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} P_{23}(t) &= a_{13}(t)P_{21}(t) + a_{23}(t)P_{22}(t) + a_{33}P_{23}(t) = \\ &= \lambda P_{21}(t) + \lambda P_{22}(t) = \lambda P_{21} + \lambda [1 - P_{21}(t) - P_{23}(t)] = \\ &= -\lambda P_{23}(t) + \lambda \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} P_{12}(0) &= P_{13}(0) = P_{21}(0) = P_{31}(0) = P_{32}(0) = 0 \\ P_{11}(0) &= P_{22}(0) = P_{33}(0) = 1 \end{aligned} \quad (25)$$

Рішенням системи диференціальних рівнянь (21 – 25) є такі перехідні ймовірності:

$$P_{12}(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} e^{-\lambda t} + \frac{\mu}{\mu + \nu} e^{-(\lambda + \mu + \nu)t} \quad (26)$$

$$P_{13}(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (27)$$

$$P_{11}(t) = 1 - P_{12}(t) - P_{13}(t) = \frac{\nu}{\mu + \nu} e^{-\lambda t} + \frac{\mu}{\mu + \nu} e^{-(\lambda + \mu + \nu)t} \quad (28)$$

$$P_{21}(t) = \frac{\nu}{\mu + \nu} e^{-\lambda t} - \frac{\mu}{\mu + \nu} e^{-(\lambda + \mu + \nu)t} \quad (29)$$

$$P_{22}(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (30)$$

$$P_{22}(t) = 1 - P_{21}(t) - P_{23}(t) = \frac{\mu}{\mu + \nu} e^{-\lambda t} + \frac{\nu}{\mu + \nu} e^{-(\lambda + \mu + \nu)t} \quad (31)$$

$$P_{31}(t) = P_{32}(t) = 0 \quad (32)$$

$$P_{33}(t) = 1 \quad (33)$$

В формулах (26 – 33)  $\mu$  – інтенсивність переходу ДВ до режиму “пам’ять”,  $\nu$  – інтенсивність переходу ДВ з режиму “пам’ять” до працездатного режиму,  $\lambda$  – інтенсивність відмов ДВ.

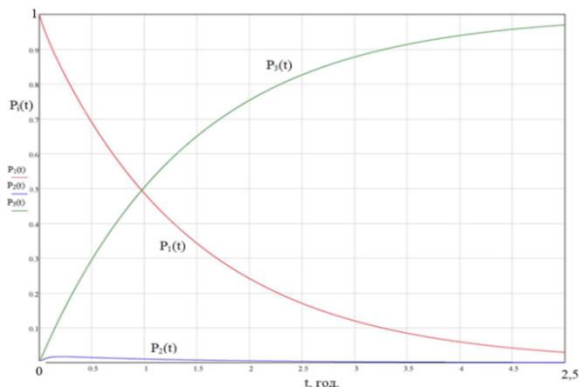


Рисунок 4. Ймовірності  $P_i(t)$  перебування ДВ у станах моделі при  $\lambda = 0,7$ ;  $\nu = 14$ ;  $\mu = 0,3$

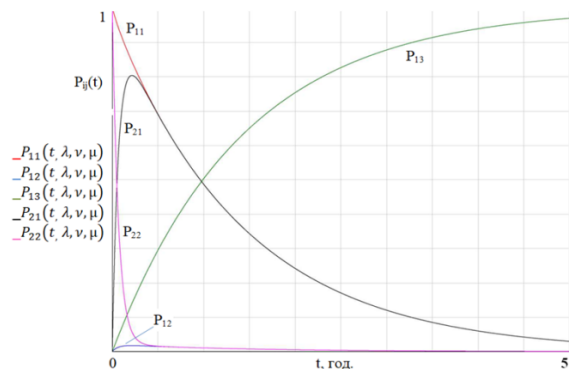


Рисунок 5. Перехідні ймовірності  $P_{ij}(t)$  моделі при  $\lambda = 0,7$ ;  $\nu = 14$ ;  $\mu = 0,3$

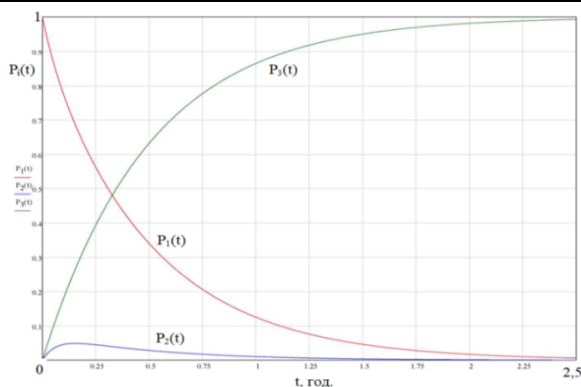


Рисунок 6. Ймовірності  $P_i(t)$  перебування ДВ у станах моделі при  $\lambda = 2$ ;  $\nu = 12$ ;  $\mu = 1$

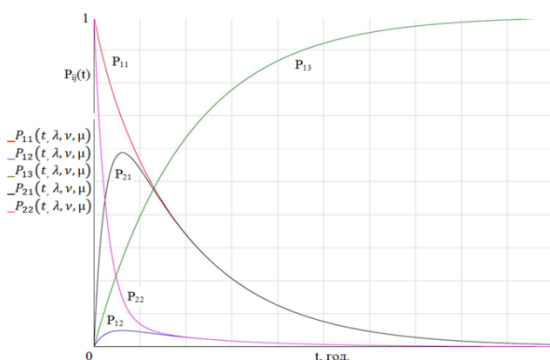


Рисунок 7. Перехідні ймовірності  $P_{ij}(t)$  моделі при  $\lambda = 2$ ;  $\nu = 12$ ;  $\mu = 1$

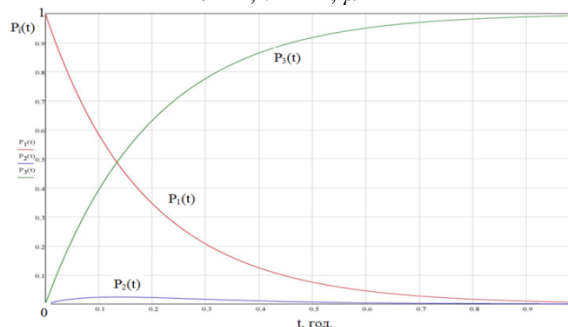


Рисунок 8. Ймовірності  $P_i(t)$  перебування ДВ у станах моделі при  $\lambda = 5$ ;  $\nu = 5$ ;  $\mu = 0,5$

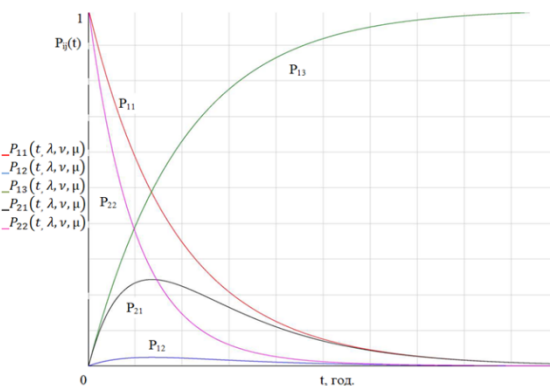


Рисунок 9. Перехідні ймовірності  $P_{ij}(t)$  моделі при  $\lambda = 5$ ;  $\nu = 5$ ;  $\mu = 0,5$

На рисунках 4 – 9 зображено ймовірності перебування ДВ у станах моделі при різних значеннях  $\lambda$ ,  $\nu$  та  $\mu$ .

## Обговорення

В теперішній час визначення поточних координат літальних апаратів, зокрема бомбардувальної та військово-транспортної авіації, здійснюється за рахунок супутникової системи навігації. Як правило, штурман має приймати сигнал GPS і за його допомогою визначати координати з високою точністю. В разі відсутності інформації від супутника потрібно використовувати автономні системи навігації, при цьому визначення поточних координат літального апарату здійснюється шляхом інтегрування шляхової швидкості літака.

В роботі здійснено розрахунок ймовірностей стану доплерівського вимірювача з використанням марковського випадкового процесу, який передбачає побудову математичної моделі досліджуваного об'єкту з виконаннями дискретних станів та безперервного часу.

Для заданих інтенсивностей переходів отримані ймовірності "P" "1" "(t)", "P" "2" "(t)" та "P" "3" "(t)", де "P" "1" "(t)" – ймовірність перебування у справному стані, "P" "2" "(t)" – у режимі "Пам'ять", "P" "3" "(t)" – ймовірність відмови ДВ.

Запропонований метод передбачає застосування експоненціального закону розподілу часу перебування у станах моделі.

Характерною особливістю отриманих розрахунків є те, що у будь-який момент часу сума зазначених ймовірностей дорівнює одиниці. З отриманих показників видно, що ця умова виконується.

При зменшенні ймовірності перебування у справному стані з'являється ймовірність переходу в режим "Пам'ять".

Крім того, для розглянутих початкових станів за одну годину польоту ймовірність повної відмови ДВ складає приблизно 1%, що добре співпрацює з проміжними результатами застосування ДВ.

## Висновки

Для побудови математичної моделі використовуються дані, що можуть бути отримані, зокрема, на літаках бомбардувальної авіації, за допомогою наземної де шифрувальної системи "Верба". Під час зміни режиму польоту, наприклад, коли літак летить із досить великим креном або тангажем, у певні чарунки оперативного запам'ятовуючого пристрою записується інформація про перехід ДВ до режиму "Пам'ять" або його відмову. Результати роботи можуть бути використані в групі регламентних робіт по радіоелектронному обладнанню для оцінки впливу роботи ДВ на ефективність виконання літаком бойових завдань.

Також, отримані в роботі результати математичного моделювання можуть бути використані для оцінки ефективності бомбометання з літального апарату під час горизонтального польоту.

## Список використаних джерел

1. Опенько П.В., П'явчук О.О., Яблонський П.М., Миронюк М.Ю., Козир А.Г. Математична модель технічного обслуговування зразків озброєння та військової техніки з використанням розподілу часу безвідмовної роботи виробів у вигляді закону Вейбулла ДНД ВС ОБТ, м. Чернігів. Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки /

ДНД ВС ОБТ. – Чернігів: Євенок О.О., 2022. – Вип. № 2(12). – 93-108 – ISSN 2706-7386.

2. Мірненко В.І., Яблонський П.М., Кітік С.В. Застосування дифузійно-немоного розподілу для моделювання процесу експлуатації радіоелектронної техніки // Social development & Security – 2019. – №6 – с. 37-46.

3. Ленков С.В., Цицарев В.М., Осипа В.О., Браун В.О. Математическая модель процесса технического обслуживания и ремонта сложных объектов радиоэлектронной техники. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Київ. 2013. № 39. С. 12-19.

4. П'явчук О.О. Математична модель зберігання авіаційних засобів ураження із застосуванням дифузійно-немоного розподілу їх відмов / О.О. П'явчук, П.В. Опенько, П.М. Яблонський, В.П. Диптан // науковий журнал "Честь і закон", випуск X: НАНУ, 2022, №3 (82), С. 99 – 107.

5. Мірненко В.І. Порівняння ефективності технічного обслуговування виробів авіаційної техніки, що експлуатуються за технічним станом, для моделей дифузійно-моного і дифузійно-немоного розподілів відмов / [В.І. Мірненко, П.М. Яблонський, С.О. Пустовий, О.В. Авраменко] – К: НУОУ, Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони, 2015. – № 2 (23) – с. 88-93.

6. Кітік С.В. Напівмарківська математична модель технічного обслуговування радіоелектронних засобів зенітного ракетного озброєння // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони – 2019. – №3(36) – с.29-34.

7. Мирненко В.И., Яблонский П.М., Пустовой С.А., Авраменко А.В. Математическая модель технического обслуживания изделий авиационной техники с использованием диффузионно-моного распределения отказов. Оралдың Ғылым Жаршысы. Уралнаучника. 2014. №21 (100). С.12-22.

8. Куртсеітов Т.Л., Копашинський С.А., Яблонський П.М. Порівняння законів розподілу (моделей відмов) для опису процесів, що відбуваються у математичній моделі експлуатації (зберігання) засобів ураження на стадіях життєвого циклу "використання" та "підтримка". Journal of Scientific Papers "Social Development and Security", Vol. 13, No. 6, – 2023. – pp 88 – 94. – ISSN 2522-9842.

9. Cox, M. Evaluation of Measurement Uncertainty Based on the Propagation of Distributions Using Monte Carlo Simulation / M. Cox, P. Harris, B. R.-L. Siebert // Measurement Techniques, Vol. 46 Is. 9, 2013. – pp 824 - 833.

10. Войчук В.А. та ін. Бортові радіоелектронні системи. Ч.1. – К.: НАУ, 2006.

11. Войчук В.А., Романенко В.І., Васягін Д.В. Експлуатація й ремонт радіоелектронного обладнання літаків, вертольотів та авіаційних ракет. (Електронний підручник ЕП001). – К.: НАУ, 2011.

12. Novikov V.V. Numerical methods for uncertainty of measurements results calculation. // Конференція молодих учених із сучасних проблем механіки і математики імені академіка Я.С. Підстригача. Тези доповідей. – Львів, 2009. – С. 147-148.

13. Wubbeler G. Evaluation of measurement uncertainty and its numerical calculation by a Monte Carlo method / G. Wubbeler, M. Krystek, C.Elster // Measurement Science and Technology, Vol.19 Is. 8, 2008.

14. Angeles Herrador M. Evaluation of measurement uncertainty in analytical assays by means of Monte Carlo simulation / M. Angeles Herrador, A.Gustavo Gonzalez // Talanta, Vol. 64 Is. 2, 2004. – pp 415 – 422.

15. Ключко Н.Б., Слабінога М.О., Тутка О.О. Застосування методу монте-карло для оцінки похибки доплерівських вимірювачів швидкості та кута зносу [Електрон. ресурс]. Режим доступу: [http://clar.nung.edu.ua/bistream/123456789/4303/1/5\\_404p.pdf](http://clar.nung.edu.ua/bistream/123456789/4303/1/5_404p.pdf) – Дата публікації: 18.06.2016. – Дата перегляду: 24.03.2024.

16. Рогожин В.О., Скрипещ А.В., Філяшкін М.К., Мухіна М.П. Автономні системи навігації конкретного типу повітряного судна та їх технічне обслуговування: навч. посібник. – К.: НАУ, 2015. – 308 с.

**Petro Yablonskyi** (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0003-2651-4299>

**Oleksiy Maistrov** (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0002-9054-8293>

**Yurii Koskov**

<https://orcid.org/0000-0003-4707-9898>

**Yurii Sarapin**

<https://orcid.org/0000-0003-2893-4975>

*The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

## DETERMINATION OF THE PROBABILITY OF STATES OF THE DOPPLER PLANE VELOCITY METER AND THE DRIFT ANGLE OF AN AIRCRAFT USING A MARKOV RANDOM PROCESS

*The work examines the topical issue of the accuracy of aircraft navigation. The calculation of the state probabilities of the Doppler meter was carried out using the Markov random process, which involves the construction of a mathematical model of the object under study using discrete states and continuous time. The proposed method of mathematical modeling involves the application of the exponential law of the distribution of the time spent in the states of the model. On the basis of the obtained analytical dependencies, graphs of the Doppler meter's stay in the model states were constructed. The results of mathematical modeling obtained in the work can be used to evaluate the effectiveness of bombing from an aircraft during its horizontal flight.*

**Keywords:** *mathematical model, system; modeling, calculation of probabilities, efficiency, refusal, Markov processes.*

### References

1. Openko P.V., Pyavchuk O.O., Yablonskyi P.M., Mironyuk M.Yu., Kozyr A.H. Mathematical Model of Maintenance of Weaponry and Military Equipment Samples Using the Weibull Distribution Law of Time Between Failures, DNDI VS OVT, Chernihiv. Collection of Scientific Papers of the State Scientific Research Institute of Testing and Certification of Weapons and Military Equipment / DNDI VS OVT. – Chernihiv: Evenok O.O., 2022. – Issue No. 2(12). – 93-108– ISSN 2706-7386.
2. Mimenko V.I., Yablonskyi P.M., Kityk S.V. Application of Diffusion-Nonmonotonic Distribution for Modeling the Operation Process of Radio Electronic Equipment // Social Development & Security – 2019. – No. 6 – pp. 37-46.
3. S.V. Lenkov, V.M. Tsitsaryev, V.O. Osypa, V.O. Braun. Mathematical Model of the Maintenance and Repair Process of Complex Radio Electronic Equipment. Collection of Scientific Papers of the Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Kyiv. 2013. No. 39. pp. 12-19.
4. Pyavchuk O.O. Mathematical Model of Storage of Aviation Munitions Using the Diffusion-Nonmonotonic Distribution of Their Failures / O.O. Pyavchuk, P.V. Openko, P.M. Yablonskyi, V.P. Dyptan // Scientific Journal “Honor and Law”, issue Kh.: NANGU, 2022, No. 3 (82), pp. 99 – 107.
5. Mimenko V.I. Comparison of the Maintenance Efficiency of Aviation Equipment Operated Based on Technical Condition for Diffusion-Monotonic and Diffusion-Nonmonotonic Failure Distribution Models / [V.I. Mimenko, P.M. Yablonskyi, S.O. Pustovyi, O.V. Avramenko] – K.: NUOU, Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defense, 2015. – No. 2 (23) – pp. 88-93.
6. Kityk S.V. Semi-Markov Mathematical Model of Maintenance of Radio Electronic Means of Anti-Aircraft Missile Systems. // Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defense – 2019. – No. 3(36) – pp. 29-34.
7. Mimenko V.I., Yablonskyi P.M., Pustovyi S.O., Avramenko A.V. Mathematical Model of Maintenance of Aviation Equipment Using Diffusion-Monotonic Failure Distribution. Oral's Science Bulletin. Uralnaukniga. 2014. No. 21 (100), pp. 12-22.
8. Kurtseitov T.L., Kopashynskiy S.A., Yablonskyi P.M. Comparison of Distribution Laws (Failure Models) for Describing Processes Occurring in the Mathematical Model of Operation (Storage) of Munitions at the Life Cycle Stages of "Usage" and "Support". Journal of Scientific Papers “Social Development and Security”, Vol. 13, No. 6, – 2023. – pp. 88-94. – ISSN 2522-9842.
9. Cox, M. Evaluation of Measurement Uncertainty Based on the Propagation of Distributions Using Monte Carlo Simulation / M. Cox, P. Harris, B. R.-L. Siebert // Measurement Techniques, Vol. 46, Is. 9, 2013. – pp. 824-833.
10. Voichuk V.A. et al. Onboard Radio Electronic Systems. Part 1. – K.: NAU, 2006.
11. Voichuk V.A., Romanenko V.I., Vasyagin D.V. Operation and Repair of Radio Electronic Equipment of Aircraft, Helicopters, and Aviation Missiles. (Electronic Textbook EP001). – K.: NAU, 2011.
12. Novikov V.V. Numerical Methods for Uncertainty of Measurement Results Calculation. // Conference of Young Scientists on Modern Problems of Mechanics and Mathematics Named After Academician Y.S. Pidstryhach. Abstracts of Reports. – Lviv, 2009. – pp. 147-148.
13. Wubbeler G. Evaluation of Measurement Uncertainty and its Numerical Calculation by a Monte Carlo Method / G. Wubbeler, M. Krystek, C. Elster // Measurement Science and Technology, Vol. 19, Is. 8, 2008.
14. Angeles Herrador M. Evaluation of Measurement Uncertainty in Analytical Assays by Means of Monte Carlo Simulation / M. Angeles Herrador, A. Gustavo Gonzalez // Talanta, Vol. 64, Is. 2, 2004. – pp. 415-422.
15. Klochko N.B., Slabinoga M.O., Tutka O.O. Application of the Monte Carlo Method for Error Estimation of Doppler Speed and Drift Angle Meters [Electronic resource]. Access mode: [http://elar.nung.edu.ua/bistream/123456789/4303/1/5\\_404p.pdf](http://elar.nung.edu.ua/bistream/123456789/4303/1/5_404p.pdf) – Date of publication: 18.06.2016. – Date of view: 24.03.2024.
16. Rogozhin V.O., Skripets A.V., Filyashkin M.K., Mukhina M.P. Autonomous Navigation Systems of a Specific Type of Aircraft and Their Maintenance: A Textbook. – K.: NAU, 2015. – 308 p.